

А  
3-141  
УДК 620.179.14

На правах рукописи

**ЗАГИДУЛИН Ринат Васикович**

**РАСПОЗНАВАНИЕ ДЕФЕКТОВ СПЛОШНОСТИ  
В ФЕРРОМАГНИТНЫХ ИЗДЕЛИЯХ**

05.11.13 Приборы и методы контроля природной среды  
веществ, материалов и изделий

**НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА**

Уральского Госуниверситета  
г.Екатеринбург

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Уфа 2001



Работа выполнена в ОАО «Научно-производственная фирма «Геофизика».

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор  
В.Е. Шатерников

доктор технических наук,  
профессор  
А.К. Денель

доктор технических наук,  
профессор  
А.Д. Покровский

Ведущая организация: ВНИИГАЗ (Московская обл., пос.  
Развилка).

Защита диссертации состоится «17» апреля 2002 г.  
в 10 часов на заседании диссертационного Совета  
Д520.010.01 в ЗАО «Научно-исследовательском институте  
Интроскопии МНПО «Спектр» по адресу: 119048, г. Москва,  
ул. Усачева, 35, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
НИИИН.

Автореферат разослан «15» марта 2002 г.

Ученый секретарь диссертационного Совета,

к.т.н.



Туробов Б.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Технология производства и безопасной эксплуатации большого класса ферромагнитных изделий предусматривает контроль их качества неразрушающими методами. Важное место среди них занимают магнитные методы контроля, которые обеспечивают высокую надежность и скорость контроля, возможность бесконтактного съема информации и являются экологически безопасными для персонала.

Одной из актуальных задач неразрушающих методов контроля изделий является обнаружение дефектов сплошности, оценка их месторасположения и геометрических параметров, которые используются для диагностики технического состояния изделия. Если задача обнаружения дефектов сплошности в магнитной дефектоскопии удовлетворительно решена для ферромагнитных изделий достаточно простых форм, то оценка геометрических параметров дефектов остается наиболее актуальной задачей.

Методы оценки отдельных геометрических параметров дефектов сплошности, которые основаны на использовании однозначной зависимости их от отдельных признаков магнитного поля, имеют ограниченную точность и область практического применения, и в целом не решают задачу. Это связано с тем, что в магнитной дефектоскопии зависимость магнитного поля дефекта сплошности от геометрических параметров очень сложна и является результатом влияния многих факторов. Существующие экспериментальные данные и теоретические модели дефектов во многом упрощают эти зависимости и не полностью отражают действительную картину. Введение зависимостей геометрических параметров дефектов сплошности от признаков классификации эмпирически, путем использования методов распознавания образов, позволяет в целом получить решение задачи для некоторых изделий. Однако при этом выбор признаков классификации дефекта сплошности и условий создания оптимальной обучающей выборки дефектов осуществляются субъективно, без строгого математического анализа, что не позволяет достичь оптимальной точности оценки геометрических параметров дефектов. С математической точки зрения задача оценки

геометрических параметров дефекта в ферромагнитном изделии по измеренному магнитному полю относится к классу обратных задач, для удовлетворительного решения которых требуются достаточно хорошо разработанные теоретические модели дефектов сплошности. Использование упрощенных теоретических моделей дефектов не позволяют получить удовлетворительные оценки геометрических параметров дефектов, даже если применять довольно мощные математические методы решения обратных задач. Отсутствие универсальной модели дефекта сплошности, описывающей магнитные поля дефектов разных типов (поверхностных и внутренних) еще более усложняет решение задачи.

Для решения поставленной задачи перспективным является применение математических методов решения обратных задач на основе теоретической универсальной модели дефекта сплошности в ферромагнитном изделии, наиболее полно описывающей магнитное поле дефекта в воздухе. Для практической применимости решения важно также количественно оценить влияние на магнитное поле дефекта таких факторов, как кривизна контролируемой поверхности и остаточная намагниченность изделия, влияние магнитного поля соседних дефектов сплошности, если исследуемый дефект входит в состав группы дефектов.

Точность оценки геометрических параметров дефекта сплошности во многом зависит от информативности признаков классификации. До сих пор эта зависимость оставалась не изученной. Методика оценки информативности признаков классификации дефекта и выбор наиболее качественной из совокупности признаков дают возможность оптимального оценивания геометрических параметров, типа и формы дефекта сплошности в ферромагнитном изделии.

**Цель работы.** Целью настоящей работы является дальнейшее развитие основ магнитной дефектоскопии и дефектометрии и разработка физических и математических методов оценки геометрических параметров и типа дефекта сплошности в ферромагнитном изделии, создание алгоритмов для соответствующего программного обеспечения электромагнитных дефектоскопов.

**Задачи исследования.** Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Развитие теоретических основ магнитной дефектоскопии и

дефектометрии путем разработки универсальной теоретической модели дефекта сплошности и методики расчета магнитного поля дефекта с учетом нелинейности ферромагнитной среды, пригодной как для обычных условий контроля, так и для некоторых особенностей условий контроля (влияния кривизны поверхности и остаточной намагниченности изделия, наличия группы дефектов).

2. Разработка строго обоснованных алгоритмов оценки типа и геометрических параметров дефектов сплошности в ферромагнитном изделии на основе эмпирических данных.

3. Создание научно - обоснованной методики выбора признаков классификации дефектов сплошности и повышения информативности измеренных данных, методов оптимизации систем распознавания дефектов в магнитной дефектоскопии.

4. Разработка математического способа оценки геометрических параметров дефектов сплошности в ферромагнитном изделии на основе минимизации сглаживающих функционалов и методики их оптимизации.

5. Выбор оптимальных способов предварительной математической обработки измеренного магнитного поля дефектов сплошности и устранения мешающего влияния магнитного поля рассеяния.

6. Реализация разработанных методов предварительной обработки измеренной информации, оценки типа и геометрических параметров дефектов сплошности в алгоритмах для программного обеспечения существующих электромагнитных дефектоскопов.

#### **Научная новизна.**

1. Получена универсальная теоретическая модель дефекта сплошности в ферромагнитной пластине, учитывающая геометрические параметры дефекта, пластины и нелинейность магнитных свойств ферромагнетика, и методика расчета магнитных полей дефектов сплошности с учетом нелинейности магнитных свойств среды. Получены аналитические выражения для расчета плотности поверхностных зарядов на гранях дефекта в линейной и нелинейной среде с учетом всех геометрических параметров дефекта сплошности и ферромагнетика.

2. Разработаны теоретические модели распределения магнитного поля дефекта сплошности в ферромагнитной трубе, в остаточной намагниченном ферромагнитном изделии

и в составе группы дефектов, получена методика восстановления магнитного поля отдельного дефекта, входящего в состав группы дефектов.

3. Предложены методики оценки некоторых геометрических параметров дефекта, его типа и ориентации на основе использования характерных особенностей в распределении магнитного поля дефекта в воздухе над ферромагнитным изделием.

4. Предложен научно - методический подход к оценке качества и информативности признаков классификации дефектов сплошности, к оценке количества информации в измеренном магнитном поле о геометрических параметрах и форме дефекта.

5. Разработаны методы оптимизации обучающей выборки дефектов сплошности при оценке их геометрических параметров методами теории распознавания и метод оценки геометрических параметров дефекта в изделии на основе минимизации сглаживающего функционала. Предложена методика оптимизации сглаживающего функционала.

6. Разработаны методы предварительной математической обработки измеренного магнитного поля дефекта, обеспечивающие выявление полезного сигнала на фоне помех, восстановление его полной формы и истинных значений.

**Практическая ценность.** Разработанные методы становятся основой программного обеспечения электромагнитных дефектоскопов, решающих задачу обнаружения и оценки типа и геометрических параметров дефекта сплошности в металлических изделиях. На основе полученных теоретических моделей дефектов оценена степень влияния толщины, кривизны поверхности и остаточной намагниченности изделия на величину магнитного поля дефекта. Методика восстановления магнитного поля отдельного дефекта позволяет восстановить поле группы стресс - коррозионных трещин в металлическом изделии, тем самым дает принципиальную возможность решения задачи оценки их геометрических параметров. Полученные аналитические выражения количества информации в признаках классификации дефекта позволяют предсказать точность оценки его геометрических параметров и выбрать наиболее информативную совокупность признаков. Разработанные математические методы позволяют

оценивать геометрические параметры дефекта в ферромагнитном изделии с оптимальной точностью.

**Апробация работы.** Основные результаты и положения настоящей работы докладывались и обсуждались на 7-й Уральской научно-технической конференции «Современные методы неразрушающего контроля и их метрологическое обеспечение» (г.Ижевск, 1986); 8-й Уральской научно-технической конференции «Современные методы неразрушающего контроля и их метрологическое обеспечение» (г.Челябинск, 1987); 10-й Уральской научно-технической конференции (г.Ижевск, 1989); 11-й Всесоюзной научно-технической конференции «Неразрушающие физические методы и средства контроля» (г.Москва, 1987); 1-й научной конференции молодых ученых – физиков РБ (г.Уфа, 1994); 5 - й Международной деловой встрече «Диагностика-95» (г.Ялта, 1995); 14-й Российской научно - технической конференции «Неразрушающий контроль и диагностика» (г.Москва, 1996); 2-й Международной конференции «Компьютерные методы и обратные задачи в неразрушающем контроле и диагностике» (г.Минск, 1998); 15-й Российской научно - технической конференции «Неразрушающий контроль и диагностика» (г.Москва, 1999); 3 -й Международной научной конференции «Компьютерные методы и обратные задачи в неразрушающем контроле и диагностике» (г.Москва, 2002).

**Публикации.** Материал диссертации опубликован в 51 печатной работе.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 8 глав, заключения, списка литературы из 303 наименований, 3 приложений. Общий объем работы составляет 412 страниц, содержит 72 таблицы и 120 рисунков.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** излагаются основные цели и методы работы, а также дается общая характеристика работы и ее краткое описание.

**В первой главе** проведен анализ современного состояния проблемы, постановка целей и задач исследований. Установлена необходимость разработки теоретических моделей дефектов сплошности, адекватно описывающих магнитные поля при разных условиях контроля,

и оптимальных методов решения задачи оценки типа и геометрических параметров дефекта в ферромагнитном изделии.

**Во второй главе** разрабатываются универсальные теоретические модели дефекта в виде трещины в плоской пластине, в трубе и в остаточном намагниченном изделии с учетом нелинейности магнитных свойств ферромагнетика по единой методике. Предлагается токовая модель при неоднородном намагничивании граней дефекта и модель группы дефектов в плоской пластине. На их основе оценивается влияние различных факторов на поле дефекта, а также предлагаются методы разрешения и восстановления магнитного поля группы дефектов.

Расчет магнитного поля дефекта  $H$  в ферромагнетике сводится к решению нелинейного дифференциального уравнения:

$$\operatorname{div} H = -\frac{1}{\mu} \frac{\partial \mu}{\partial H} H \operatorname{grad} H, \quad (1)$$

где  $\mu$  - относительная магнитная проницаемость. В комплексной плоскости в первом приближении уравнение (1) имеет вид:

$$4 \frac{\partial^2 F(w, \bar{w})}{\partial w \partial \bar{w}} = -K \left[ f'(w) \bar{f}'^2(w) \right] / \left[ f'(w) \bar{f}'(w) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

где  $F(w, \bar{w})$  - комплексный потенциал магнитного поля дефекта в нелинейной среде;  $f(w)$  - комплексный потенциал магнитного поля дефекта в линейной среде,  $w = x + iz$ ,  $i^2 = -1$ ,  $K = \partial \ln \mu / \partial H$  - коэффициент нелинейности среды. Выбор вида интерполирующей функции  $K$  в значительной степени влияет на вид решения уравнения (2). Были рассмотрены гиперболическая ( $K = -1/H$ ), которая справедлива в области технического насыщения материала, и более общая функциональная интерполяция коэффициента нелинейности среды (рис. 1):

$$K = H \sum_{i=1}^N a_{1i} \exp(-b_{1i} H^2), \quad (3)$$

где  $a_{1i}$ ,  $b_{1i}$  - коэффициенты интерполяции,  $N$  - количество интерполирующих функций.



Для наилучшей интерполяции коэффициента  $K$  в диапазоне магнитных полей от 0 до 200 А/см оказалось достаточным не более 6 - 8 функций. В качестве универсальной модели дефекта взята дипольная модель прямоугольной трещины,

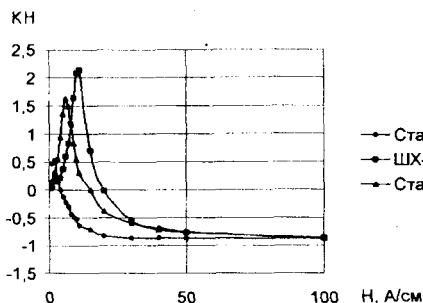


Рис.1 Зависимость коэффициента нелинейности от напряженности магнитного поля

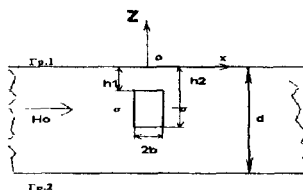


Рис.2 Дефект типа трещины в плоской пластине

расположенной в плоской пластине конечной толщины (рис.2), меняя глубину залегания которой можно моделировать как поверхностный, так и внутренний дефект. Решая уравнение (2) с коэффициентом нелинейности среды (3), получена формула распределения магнитного поля дефекта в воздухе

$$H^B(w) = f_d'(w) + f_o'(w) + \frac{f_d'(w) + f_o'(w)}{4} \sum_{i=1}^N \frac{a_{1i}}{b_{1i}} \left[ \exp(-4 b_{1i} \cdot \text{Re}^2) \dots \right. \\ \left. \dots \left[ f_d'(w) + f_o'(w) \right] - \exp(-4 b_{1i} \cdot \text{Re}^2 f_o'(w)) \right], \quad (4)$$

где  $f_d'(w)$  – комплексное магнитное поле дефекта в линейной среде,  $f_o'(w)$  – комплексное магнитное поле стороннего источника внутри ферромагнетика.

В вещественном виде  $x$  – и  $z$  – составляющие магнитного поля равны:

$$H_x(x, z) = \operatorname{Re} H^B(w), H_z(x, z) = -\operatorname{Im} H^B(w). \quad (5)$$

По сравнению с гиперболической интерполяцией коэффициента нелинейности  $K$  формулы расчета (4) наряду с высокой точностью являются довольно компактными.

Впервые получены формула магнитного поля дефекта (рис.2) внутри пластины в линейной среде (в комплексном виде, с учетом внешнего поля  $H_0$ ):

$$f'(w) = \frac{i\sigma}{2\pi} \operatorname{Ln} \frac{\sin\pi \frac{w+b+ih_1}{i2d} \sin\pi \frac{w+b-ih_2}{i2d}}{\sin\pi \frac{w+b-ih_1}{i2d} \sin\pi \frac{w+b+ih_2}{i2d}} \dots =$$

$$\dots \frac{\sin\pi \frac{w-b-ih_1}{i2d} \sin\pi \frac{w-b+ih_2}{i2d}}{\sin\pi \frac{w-b+ih_1}{i2d} \sin\pi \frac{w-b-ih_2}{i2d}} + H_0 = \frac{i\sigma}{2\pi} \operatorname{TF}(w) + H_0 \quad (6)$$

и формула расчета плотности поверхностных зарядов на гранях дефекта в пластине:

$$\sigma(z) = \frac{(\mu-1)H_0}{1 - \frac{\mu-1}{2\pi} \operatorname{Re}[i\operatorname{TF}(-b, z)]}, \quad (7)$$

где  $\operatorname{TF}(w)$  – функция от параметров дефекта и координаты точки измерения. Формула (6) используется также при расчете плотности поверхностных зарядов на гранях дефекта с учетом нелинейности магнитных свойств материала пластины.

На основе формул (6) – (7) установлено, что влияние изменения толщины пластины на величину поля дефекта не превышает 10 – 20%, если для геометрических параметров справедливо  $h/d < 0.4$ . На рис.3 показаны распределения плотности поверхностных зарядов на гранях дефекта в линейной (7) и нелинейной среде пластины, которые имеют неоднородность. Магнитное поле дефекта с неоднородной плотностью зарядов на гранях можно заменить системой

токовых пластин с неоднородной поверхностной плотностью токов  $j(z)$  (рис.4). Поверхностная плотность токов  $j(z)$  на пластине связана с плотностью зарядов на гранях формулой  $j(z) = \sigma(z) 2b$ . Установлено, что если область неоднородности плотности не превышает 25%, то ошибка в расчетах, от принятия плотности поверхностных зарядов на гранях дефекта постоянной, не превышает 5 -13%.

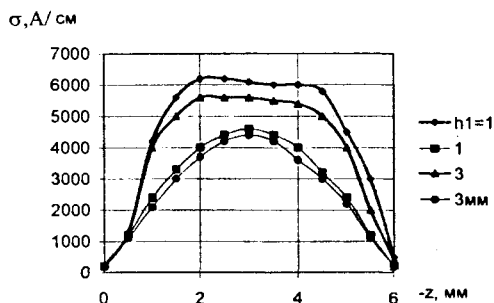


Рис.3 Распределение зарядов на гранях дефекта в плоской пластине  $d=10$  мм,  $H_0=100$  A/cm,  $\mu = 140$

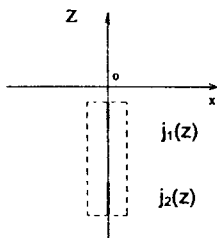


Рис.4 Неоднородная токовая модель ВД

Для дипольной модели бесконечно протяженной трещины в трубе (рис.5) было получено решение уравнения (2) с гиперболической интерполяцией коэффициента нелинейности среды и формулы расчета плотности зарядов на ее гранях. На основе формул распределения магнитного поля трещины над внешней и внутренней поверхностями трубы установлено, что влияние кривизны поверхности трубы на магнитное поле поверхностного дефекта не превышает 5%, если отношение  $h/R < 0.1$ , и для внутреннего дефекта - если  $R > 80$  мм. При малых радиусах трубы внутренняя поверхность трубы ведет себя как цилиндрический дефект, который увеличивает магнитное поле дефекта в воздухе.

В остаточном намагниченном изделии с дефектом (рис.6) скачок намагниченности происходит на гранях и в области над гранями дефекта. В этих местах вводятся поверхностные и объемные заряды, для описания поля последних используется магнитный диполь. Решение

магнитомягким ( $H_c \rightarrow 0$ ,  $M_{rs}/M_s \rightarrow 0$ ), то остаточная плотность поверхностных зарядов на гранях дефекта  $\sigma_{or} \rightarrow 0$ , и остаточное магнитное поле дефекта равно 0. Из формулы (8) следует, что в области намагничивающих полей, близких к коэрцитивной силе материала, знак остаточных зарядов

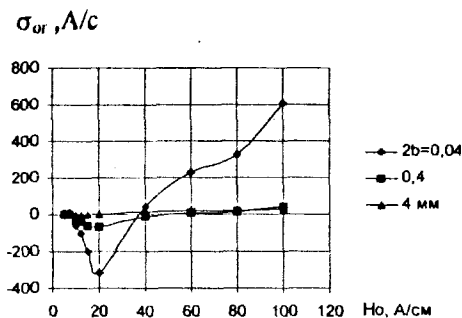


Рис.7 Зависимость остаточной плотности зарядов на гранях ВД  $h_1 = 2\text{ мм}$ ,  $h = 4\text{ мм}$ , ШХ – 15

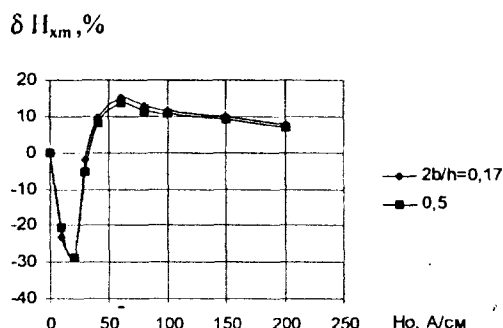


Рис.8 Изменение поля ВД при повторном намагничивании  $z=1\text{ мм}$ , ШХ-15

на гранях дефекта меняется на противоположный (рис.7), что находит экспериментальное подтверждение. При повторном намагничивании остаточно намагниченного изделия, в зависимости от величины намагничивающего поля, амплитуда магнитного поля дефекта может как увеличиваться, так и уменьшаться (рис.8).

Формирование магнитного поля дефектов в группе осуществляется в результате их взаимовлияния, поэтому в модели группы дефектов (рис.9) поверхностные заряды на гранях дефекта и магнитное поле в воздухе рассчитываются согласованным образом. Расчеты показали, что из-за влияния первого дефекта, следующий дефект оказывается «в тени» и на его гранях при малых расстояниях  $x_1$  индуцируется меньшее количество магнитных зарядов. При весьма близком расположении дефектов это уменьшение может составить до 50%. Группа дефектов разрешается по топографии магнитного поля (количество максимумов равно числу

магнитомягким ( $H_c \rightarrow 0$ ,  $M_{rs}/M_s \rightarrow 0$ ), то остаточная плотность поверхностных зарядов на гранях дефекта  $\sigma_{or} \rightarrow 0$ , и остаточное магнитное поле дефекта равно 0. Из формулы (8) следует, что в области намагничивающих полей, близких к коэрцитивной силе материала, знак остаточных зарядов

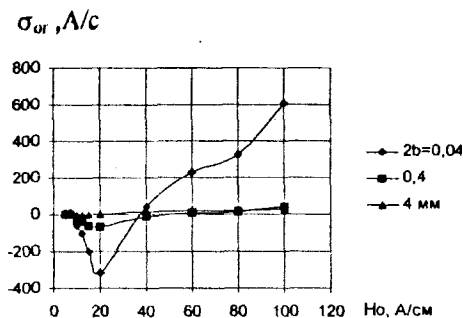


Рис.7 Зависимость остаточной плотности зарядов на гранях ВД  $h_1 = 2$  мм,  $h = 4$  мм, ШХ – 15

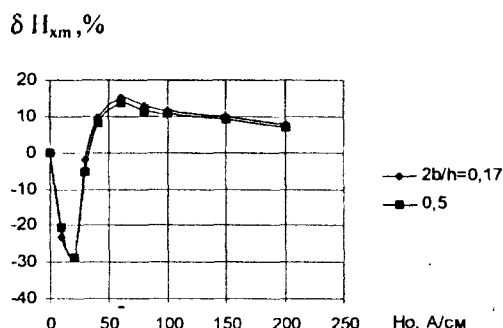


Рис.8 Изменение поля ВД при повторном намагничивании  $z=1$  мм, ШХ-15

на гранях дефекта меняется на противоположный (рис.7), что находит экспериментальное подтверждение. При повторном намагничивании остаточно намагниченного изделия, в зависимости от величины намагничивающего поля, амплитуда магнитного поля дефекта может как увеличиваться, так и уменьшаться (рис.8).

Формирование магнитного поля дефектов в группе осуществляется в результате их взаимовлияния, поэтому в модели группы дефектов (рис.9) поверхностные заряды на гранях дефекта и магнитное поле в воздухе рассчитываются согласованным образом. Расчеты показали, что из-за влияния первого дефекта, следующий дефект оказывается «в тени» и на его гранях при малых расстояниях  $x_1$  индуцируется меньшее количество магнитных зарядов. При весьма близком расположении дефектов это уменьшение может составить до 50%. Группа дефектов разрешается по топографии магнитного поля (количество максимумов равно числу

дефектов в группе), если величина локального минимума  $x$  - составляющей суммарного поля по отношению к одному из его максимумов составляет не более 75 %:

$$H_{\min}(x_1)/H_{\max}(x_1) \leq 0.75 \quad (9)$$

Величину расстояния  $x_{1m}$ , которая соответствует равенству в формуле (9), назовем минимальным расстоянием разрешения дефектов по полю. Величина минимального

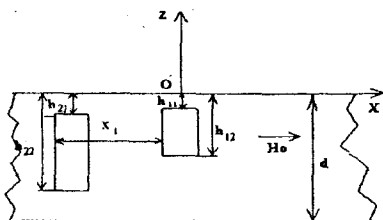


Рис.9 Группа дефектов в плоской пластине

$Hx, A/cm$

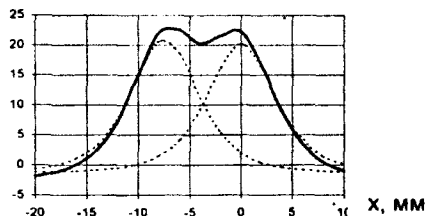


Рис.10 X-составляющая поля группы дефектов  
 $z = 5 \text{ мм}, h = 5 \text{ мм}$

расстояния  $x_{1m}$  возрастает с ростом высоты измерения магнитного поля по линейному закону, слабо зависит от ширины дефекта и определяется соотношением параметров  $h/d$ . Установлено, что по высоте измерения поля можно предсказать минимальное расстояние разрешения дефектов по топографии магнитного поля.

Восстановление магнитного поля группы дефектов осуществляется путем минимизации сглаживающего функционала, состоящего из теоретической модели и измеренного поля:

$$F = \sum_{j=1}^{N_1} \left[ H_x^2(x_j) - \sum_{k=1}^N J_k \frac{z_k}{(x_j - x_k)^2 + z_k^2} \right]^2 + \Omega(J, z) \quad (10)$$

где  $N_1$  – число точек в измеренном поле группы дефектов  $H_x^3(x)$ ,  $x_k, z_k$  – координаты линейного тока  $J$ ,  $\Omega(J, z)$  – стабилизирующий функционал. Значения  $J$ ,  $z$ , соответствующие глобальному минимуму функционала (10), берутся в качестве параметров углубленных линейных токов, характеризующих магнитное поле группы дефектов. Результаты минимизации сглаживающего функционала показали, что точность восстановления магнитного поля отдельного дефекта из группы увеличивается от 6 до 20 %. Показано существенное увеличение разрешения группы дефектов по второй производной распределения поля и точности восстановления магнитного поля группы дефектов при использовании в функционале (10) токовой модели дефекта.

**В третьей главе** рассматриваются эмпирические методы оценки типа и некоторых геометрических параметров дефекта, которые не требуют громоздких вычислений. На основе теоретической модели поверхностного дефекта (ПД) были определены условия, при которых амплитуда магнитного поля ПД пропорциональна глубине дефекта и слабо зависит от его ширины ( $2b/h \geq 0.1$ ;  $y/2b \geq 1$ ), которые хорошо согласуются с экспериментально полученными данными. Исследования топографии магнитного поля ПД в пластине показали, что в распределении поля дефекта в точке с абсциссой  $x_m \neq 0$  значение магнитного поля практически не зависит от высоты измерения, слабо зависит от ширины и пропорционально глубине дефекта (рис. 11, 12).

Это свойство присуще также полю внутренних дефектов (ВД) и дефектов внутренней поверхности (ДВП). При измерении магнитного поля дефектов на высоте от 1 до 3 мм было установлено, что для ПД значение  $x_m \approx 2$  мм, для ВД и ДВП  $x_m \approx 3 - 4$  мм. При этом на основе значения магнитного поля дефекта в точке  $x_m$ , измеренного с погрешностью не более 10%, параметр  $h$  дефекта оценивается с погрешностью не более 10 - 15 %. Для повышения точности оценки рекомендуется ограничивать область вариации высоты измерения магнитного поля и геометрических параметров исследуемых дефектов.

На основе анализа значения  $x_m$  определяется тип дефекта: если  $x_m \leq 2$  мм, дефект относится к ПД, если  $x_m > 3$

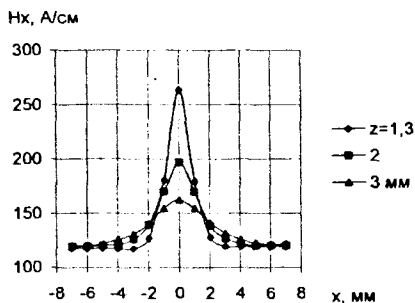


Рис.11 Магнитное поле ПД  
2b=0.35 мм, h = 1 мм,

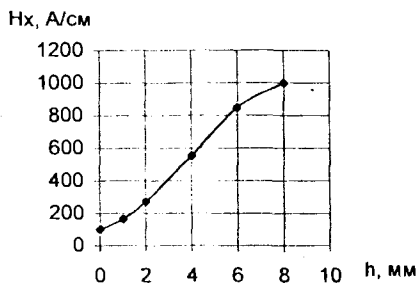


Рис.12 Зависимость поля ПД  
в точке  $x_m$  от глубины  
 $d = 10$  мм,  $H_0 = 100$  А/см

мм, то дефект относится к ВД. Данная методика оценки типа дефекта слабо зависит от вариации высоты измерения поля. Приводится описание макета устройства, реализующего описанный способ оценки параметра  $h$  дефекта в ферромагнитном изделии. Датчик магнитного поля измеряет  $\text{grad}_z H_x(x)$  и в точке, где градиент поля равен 0, по значению сигнала на одном из преобразователей и на основе зависимости, приведенной на рис.12, оценивается параметр  $h$  дефекта.

Другой способ оценки типа дефекта основан на том, что распределение  $x$  - составляющей магнитного поля схоже с функцией нормально распределенной случайной величины:  $H_x(x) = H_{xm} \exp\left(-0.5 x^2 / \sigma_x^2\right)$ , где  $H_{xm}$  – максимальное значение поля дефекта. В точке с координатой  $x_k = |\sigma_x|$  для магнитного поля дефекта справедливо соотношение:

$$H_{xm} / H_x(x_k) = \exp(0.5). \quad (11)$$

Значение координаты  $x_k$  различно для дефектов разных типов. Показано, что при сохранении условий контроля



постоянными, интервалы изменения координаты  $x_k$  уникальны для каждого типа дефекта и не перекрываются между собой.

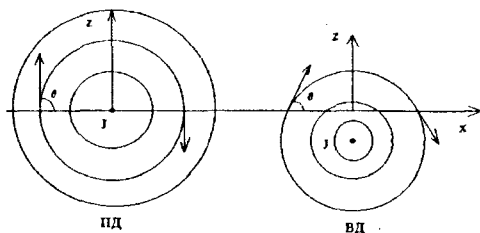


Рис. 13 Силовые линии магнитного поля ПД и ВД

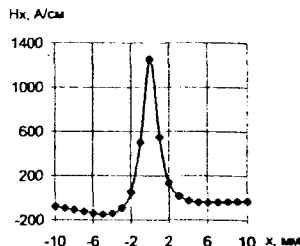


Рис. 14 Поле дефекта в пластине  
 $\alpha = 30^\circ$ ,  $h = 5.8$ ,  $z = 0.8$  мм

Известно, что силовые линии магнитного поля ПД на поверхности изделия весьма близки к полуокружностям. Из токовой модели дефекта следует, что если для ПД силовые линии магнитного поля над поверхностью изделия являются полуокружностями, то для ВД и ДВП они представляют собой сегменты окружности с центральными углами, меньшими  $180^\circ$  (рис. 13). Угол  $\theta$  касательной к линии постоянного уровня магнитного поля  $H = \text{const}$  связан с величиной центрального угла сегмента силовой линии. Угол  $\theta$  несколько зависит от параметров дефекта, но для дефектов разных типов можно выделить уникальные интервалы его изменения. Для ПД значение угла  $\theta$  весьма близко к  $\pi/2$ , для ВД и ДВП среднее значение угла  $\theta$  близко к  $\pi/4$ . Предложен метод вычисления угла  $\theta$  и установлены интервалы его изменения на основе экспериментальных исследований на искусственных образцах с дефектами.

Наклон граней дефекта на угол  $\alpha$  или его неправильная форма приводят к искажению топографии магнитного поля дефекта в воздухе (рис. 14). Приблизленную оценку формы и ориентации дефекта внутри изделия можно сделать на основе параметра:

$$M = \sum_{i=1}^N H_x(x_i) x_i / \sum_{i=1}^N H_x(x_i), \text{ где } x_i - \text{координата } i -$$

точки измерения,  $H_x(x_i)$  - величина  $x$  - составляющей поля дефекта в данной точке,  $N$  - количество точек измерения. Параметр  $M$  определяет координату центра тяжести распределения магнитного поля. Для дефектов, расположенных в ферромагнетике по нормали к поверхности изделия или имеющих форму, симметричную относительно оси  $z$ , топография магнитного поля симметрична относительно оси  $z$ , и для них значение  $M=0$ . Для дефектов, расположенных наклонно к поверхности изделия или имеющих несимметричную относительно оси  $z$  форму, топография поля дефекта несимметрична относительно оси  $z$  и для них  $M \neq 0$ . Если параметр  $M < 0$ , то это значит, что дефект наклонен вправо, если  $M > 0$ , то дефект наклонен влево от нормали к поверхности изделия. Приводятся результаты экспериментальной оценки величины  $M$  для моделей дефектов в искусственных образцах.

**В четвертой главе** исследуются признаки классификации дефекта – параметрические функции Фурье и коэффициенты в разложении магнитного поля дефекта в ряд по ортогональным функциям Эрмита, которые обеспечивают многократное уменьшение объема данных, при минимальной потере полезной информации о параметрах дефекта. Параметрические функции Фурье для  $x$  - и  $z$  - составляющих магнитного поля дефекта вычисляются по формулам (см.Рис.17):

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} a_j \\ a_j \end{Bmatrix} &= \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \begin{Bmatrix} H_x(x, z) \\ H_z(x, z) \end{Bmatrix} \cos(jx) dx, \\ \begin{Bmatrix} b_j \\ b_j \end{Bmatrix} &= \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \begin{Bmatrix} H_x(x, z) \\ H_z(x, z) \end{Bmatrix} \sin(jx) dx, \end{aligned} \quad (12)$$

$j = 0, 1, 2, \dots$  При масштабировании аргумента тригонометрических функций параметрические функции Фурье совпадают с коэффициентами Фурье. В работе

получены формулы параметрических функций Фурье для моделей дефектов в ферромагнетике. Для ПД параметрические функции (12) имеют вид (рис.15):

$$a_j = \frac{\sigma b}{\pi} \exp(-jz) [1 - \exp(-jh)],$$

$$b_j = 0, \quad a'_j = 0, \quad b'_j = -a_j. \quad (13)$$

Исследованы основные свойства функций. Доказано, что условия  $b_j = a'_j, b'_j = -a_j$  выполняются во всех случаях. Из них следует, что при измерении  $x$  - и  $z$  - составляющих магнитного поля дефекта в одинаковых условиях, параметрические функции Фурье дублируют друг друга и не приносят дополнительной информации о геометрических параметрах дефекта.

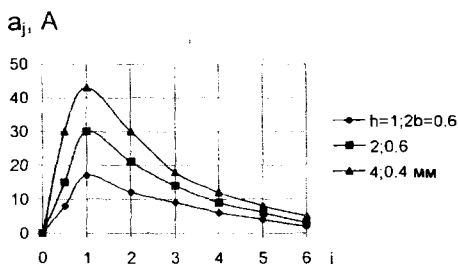


Рис.15 Параметрические функции Фурье ПД  
Но = 100 А/см, z = 1.3 мм, d = 10 мм

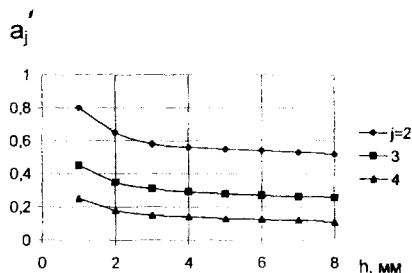


Рис.16 Относительные коэффициенты Фурье

Показано, что относительные значения параметрических функций Фурье однозначно зависят от некоторых геометрических параметров дефекта. Для ПД, поделив параметрические функции  $a_j$  (13) на значение  $a_1$ , имеем:

$$a'_j = a_j / a_1 = \exp[-z(j-1)] \frac{1 - \exp(-jh)}{1 - \exp(-h)}, \quad (14)$$

которые зависят от глубины дефекта и не зависят от его

ширины (рис.16). Значение относительных коэффициентов Фурье существенно меняется в лишь области малых глубин дефекта ( $h \leq 3$  мм), поэтому на их основе с достаточной точностью параметр  $h$  определяется лишь для неглубоких дефектов. Приведены оценки погрешностей параметров ПД и ВД.

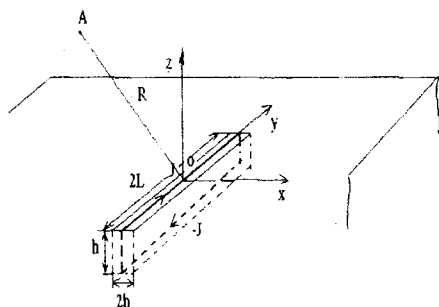


Рис.17 Дефект конечной протяженности в ферромагнетике  $n=0$ ,  $m=1$ ,  $z=1$  мм

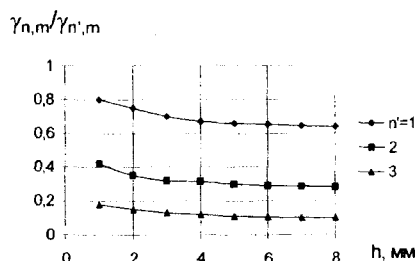


Рис.18 Относительные коэффициенты Фурье ПД

Для токовой модели дефекта конечной протяженности в пластине (рис.17) получены формулы расчета магнитного поля и плотности поверхностных зарядов на его гранях с учетом толщины изделия и соответствующие формулы для коэффициентов Фурье. Показано, что при условии  $2L/h > 5$  влияние протяженности дефекта на магнитное поле мало, что согласуется с данными эксперимента. Коэффициенты Фурье вычисляются по формуле:

$$\begin{Bmatrix} \gamma_{n,m} \\ \gamma_{n,m} \end{Bmatrix} = \frac{1}{4\pi^2(Q)} \iint \begin{Bmatrix} H_x(x,y) \\ H_z(x,y) \end{Bmatrix} \exp[-i(n x + m y)] dx dy, \quad (15)$$

где  $n, m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ,  $Q$  – область определения поля дефекта,  $i$  – мнимая единица. Для модели ПД (рис.17) вычисление интеграла (15) дает:

$$\gamma_{n,m} = \frac{\sigma b \sin(mL)}{\pi^2 m} \exp\left(-z \sqrt{n^2 + m^2}\right) \dots$$

$$\dots \left[ 1 - \exp(-h \sqrt{n^2 + m^2}) \right]$$

(16)

$$\gamma'_{n,m} = i \frac{\sigma b}{\pi^2} \sin(mL) \frac{m}{\sqrt{n^2 + m^2}} \exp\left(-z \sqrt{n^2 + m^2}\right) \dots$$

$$\dots \left[ 1 - \exp(-h \sqrt{n^2 + m^2}) \right]$$

Показано, что применение коэффициентов Фурье «сжимает» исходную информацию в несколько десятков раз. Отношение коэффициентов (16) с одинаковыми индексами  $m$ , но с разными  $n$  зависит от глубины дефекта  $h$ , высоты измерения магнитного поля дефекта и не зависит от его ширины и протяженности:

$$\gamma_{n,m} = \frac{\exp\left(-z \sqrt{n^2 + m^2}\right) \left[ 1 - \exp(-h \sqrt{n^2 + m^2}) \right]}{\gamma'_{n',m} \exp\left(-z \sqrt{n'^2 + m^2}\right) \left[ 1 - \exp(-h \sqrt{n'^2 + m^2}) \right]}$$

(17)

где  $m = 1, 2, 3, \dots, n \neq n' = 0, 1, 2, \dots$ . Значительная зависимость относительных коэффициентов Фурье от глубины дефекта наблюдается лишь в области значений  $h < 3 - 5$  мм (рис.18), поэтому на их основе с достаточной точностью параметр  $h$  оценивается лишь для неглубоких дефектов. Показано, что при соответствующем выборе индексов  $n, m$  относительные коэффициенты Фурье пропорциональны протяженности дефекта и не зависят от его остальных геометрических параметров. Приведены формулы вычисления протяженности дефекта.

Оценка качества признаков классификации разного типа осуществляется на основе сравнения их вероятностных характеристик и на основе определения количества

информации. Количество информации в признаках классификации дефектов вычисляется по формуле:

$$I(X) = - \sum_{i=1}^m P(\Omega_i) \ln(2\pi e)^{N/2} \sqrt{\Delta_N} - \int_{\omega} f^0(X) \ln f^0(\bar{X}) d\bar{X} \quad (18)$$

где  $\omega$  - область определения признаков классификации

$$\bar{X} = \{X_1, X_2, \dots, X_N\}, \quad f^0(\bar{X}) = \sum_{i=1}^m P(\Omega) f(\bar{X}), \quad f(X)$$

- нормальная функция распределения признаков классификации,  $P(\Omega)$  - априорная вероятность класса  $\Omega$ . Качество признака  $X_j$  выше чем качество признака  $X_k$ , если определяемое по формуле (18) значение количества информации  $I(X_j) > I(X_k)$ . Установлено, что для ПД информативность коэффициентов Чебышева – Эрмита выше, чем информативность коэффициентов Фурье. Для ВД и ДВП выше информативность коэффициентов Фурье. Разница в информативности коэффициентов существенна (более 50%) лишь для отдельных признаков классификации. С увеличением количества совместных признаков классификации происходит увеличение информативности признаков и уменьшение разницы между коэффициентами Фурье и Чебышева – Эрмита (рис.19). Установлено, что количество информации в признаках классификации не зависит от высоты измерения магнитного поля и уменьшается с увеличением погрешности измерений.

На основе коэффициентов Фурье для ПД (12) и ДВП определен вид функции преобразования признаков

классификации  $F(i) = a_i^{\text{ДВП}} / a_i^{\text{ПД}}$  (рис.20):

$$F(i) = \frac{e^{-i(d-h)} - e^{-i(d+h)}}{1 - e^{-i h} + e^{-i(2d-h)} - e^{-i(2d+h)}} \quad (19)$$

Из него следует, что ферромагнитная пластина для магнитного поля ПД играет роль низкочастотного фильтра: постоянная составляющая спектра поля проходит через пластину без искажения, амплитуды более высоких гармоник уменьшаются по экспоненциальному закону. Приведена методика восстановления магнитного поля ДВП по

коэффициентам Фурье, полученным через функцию преобразования (19).

$I(X), \text{з.е.}$

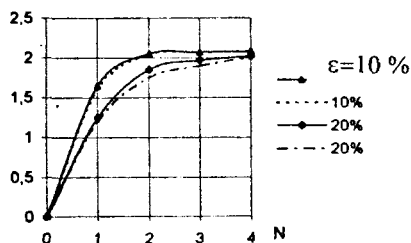


Рис.19 Зависимость информативности от количества признаков  
--- коэффициенты Фурье,  
— Чебышева – Эрмита  
 $2b = 0.9 \text{ мм}$ ,  $z = 1.3 \text{ мм}$ , сталь 3

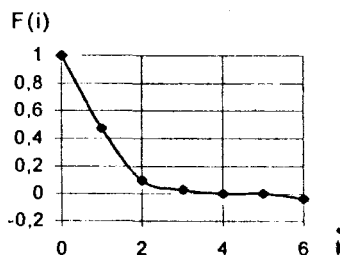


Рис.20 Функция преобразования поля  
 $d = 10 \text{ мм}$ ,  $h = 1 \text{ мм}$ ,

В пятой главе показано, что на основе количества информации в признаках классификации можно оценить его достаточность для обеспечения заданной точности оценки параметров дефекта. Например, точность оценки глубины ПД в пластине толщиной  $d$  при энтропии признаков  $H^0$  определяется по формуле:

$$\Delta h = d \exp(-H^0). \quad (20)$$

Энтропия  $H^0$  равна максимальной информации, необходимой для оценки параметра дефекта с заданной точностью (рис.21), поэтому формула (20) дает максимально возможную точность оценки данного параметра дефекта. При определении признаков классификации дефекта с погрешностью вместо энтропии  $H^0$  следует брать количество информации, вычисленное по формуле (18). Сравнительная оценка количества информации о параметрах дефекта показала, что в признаках классификации наибольшая информация содержится о глубине, наименьшая - об угле наклона дефекта (рис.22). Увеличение погрешности измерений приводит к монотонному снижению количества информации о параметрах дефекта, но увеличение

количества совместных признаков классификации существенно замедляет потерю информации, при этом наблюдается уменьшение разницы в информативности коэффициентов Фурье и Чебышева – Эрмита. В работе исследована зависимость количества информации в признаках классификации в зависимости от взаимовлияния параметров дефекта.

Рис.21 Зависимость энтропии от точности  $\Delta h$

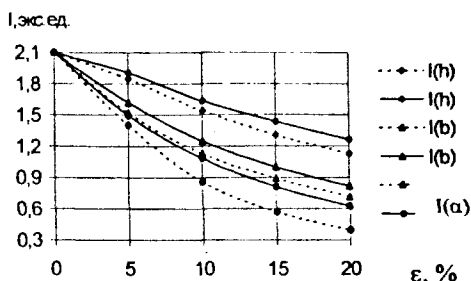
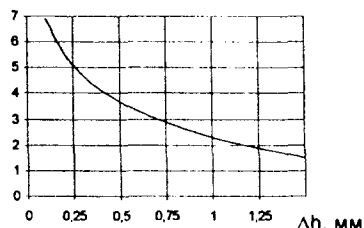


Рис.21 Зависимость энтропии от точности  $\Delta h$

Рис.22 Зависимость информации о дефекте от погрешности измерения

В признаковом пространстве параметры дефекта можно оценивать по близости его к заданным объектам обучающей выборки:

$$\omega_0 \in \Omega_i, \text{ если } L(\omega_0, \Omega_i) = \min_j L(\omega_0, \Omega_j), \quad (21)$$

где  $i \neq j = 1, 2, \dots, m$ ,  $\omega_0$  – неизвестный дефект,  $\Omega_i$  –  $i$ -й дефект обучающей выборки,  $L(\omega_0, \Omega_i)$  – расстояние между ними,  $m$  – количество дефектов в выборке. Рассмотрено вычисление расстояния по Евклиду, по Манхэттену и по Камберра. Для детерминированных признаков классификации условие верной оценки параметров дефекта при измерении его поля с погрешностью  $\varepsilon$  имеет вид:

$$L_{ij}^2 \geq \Delta L_i^2, \text{ или } \sum_{k=1}^N (\Delta X_{k-\varepsilon}^2 - X_{ik}^2) \geq 0, \quad (22)$$

где  $L_{ij}^2$  – расстояния между объектами в признаковом



пространстве,  $\Delta L_i^2$  - смещение  $i$ -го объекта при погрешности  $\varepsilon$ ,  $X_{ik}$  -  $k$ -й признак классификации  $i$  объекта.

Для линейных моделей дефектов типа ПД, ВД и ДВП на основе формулы (22) получены аналитические выражения оптимальной точности оценки параметров при данной погрешности измерения. Например, для ПД, при использовании коэффициентов Фурье (12), они имеют вид:

$$\Delta h \geq \varepsilon / \sqrt{\frac{1}{h} \sum_{k=1}^N \frac{k^2}{[\exp(kh) - 1]^2}}$$

$$\Delta(2b) \geq \varepsilon / \sqrt{\frac{1}{2b} \sum_{k=1}^N \frac{1}{(2b_k)^2}} \quad (23)$$

Из формул (23) следует, что с увеличением погрешности измерения поля происходит линейный рост погрешности оценки параметров дефекта (рис.23).

Относительная погрешность оценки параметра  $h$  для ПД, ВД и ДВП слабо зависит от параметров дефекта. Погрешность оценки ширины дефекта зависит от величины

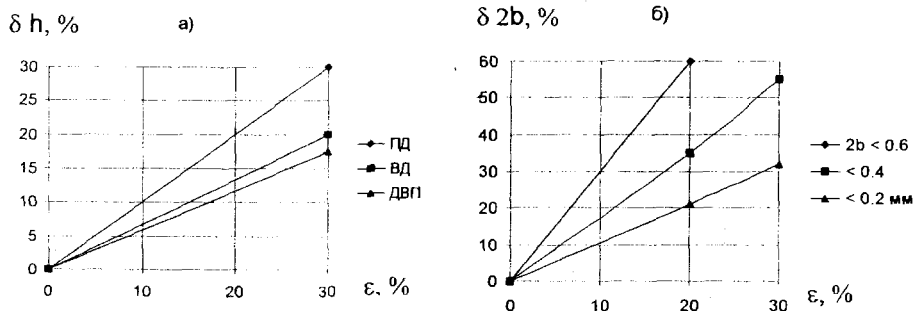


Рис.23 Зависимость погрешности оценки параметра  $h$  дефекта в плоской пластине (а) и ширины (б) поверхностного дефекта от погрешности поля

параметра  $2b$  дефекта. Исследования показали, что на точность оценки параметров дефекта не влияют высота измерения поля и способ определения расстояния между объектами в признаковом пространстве.

На основе анализа матриц ковариации признаков классификации дефектов разных типов установлено, что соответствующие кластеры в признаковом пространстве являются эллипсоидами с разными параметрами и ориентацией. В работе показано, что оценка типа дефекта по методу «ближайшего соседа», а также на основе относительных коэффициентов Фурье имеют наибольшую достоверность. На точность оценки типа дефекта существенно влияют раскрытие дефекта и высота измерения магнитного поля.

При оценке геометрических параметров дефекта на основе сравнения функций распределения признаков с обучающей выборкой наблюдается повышение точности и надежности оценок. Согласно критерию Байеса, который обеспечивает классификацию дефекта с минимальным риском ошибочного решения, дефект относится к классу  $i$ , если выполнено условие:

$$f_i(\bar{X})/f_j(\bar{X}) > \lambda_{ij}, \quad (24)$$

где  $f_i(\bar{X})$ ,  $f_j(\bar{X})$  - функция распределения  $i$  и  $j$ -го класса,  $\lambda_{ij}$  - коэффициент правдоподобия, который равен 1 при одинаковости априорных вероятностей классов  $i$  и  $j$  объектов обучающей выборки. На основе уравнений эллипсов равной плотности вероятности, соответствующих функциям распределения дефектов, установлено, что главные оси эллипсов не параллельны между собой и точка касания не совпадает ни с одной из главных осей, поэтому приведение эллипсов к каноническому виду не позволяет создать оптимальную выборку дефектов. Предлагается определять точки касания эллипсов равной плотности вероятности, то есть оптимизировать обучающую выборку дефектов путем минимизации функционала:

$$F(\bar{X}) = \frac{|f_i(\bar{X}) - f_j(\bar{X})|}{|f_i(\bar{X}) + f_j(\bar{X})|}, \quad 0 \leq F(\bar{X}) \leq 1. \quad (25)$$

Осуществлен выбор оптимального способа минимизации функционала (25). Функциональные зависимости точности параметров дефекта при использовании вероятностных признаков остаются примерно такими же, как и при использовании детерминированных признаков классификации, при этом точность оценки параметров дефекта значительно повышается (рис.24). Рассчитана вероятность ошибочной оценки типа дефекта и исследовано влияние на нее разных факторов.

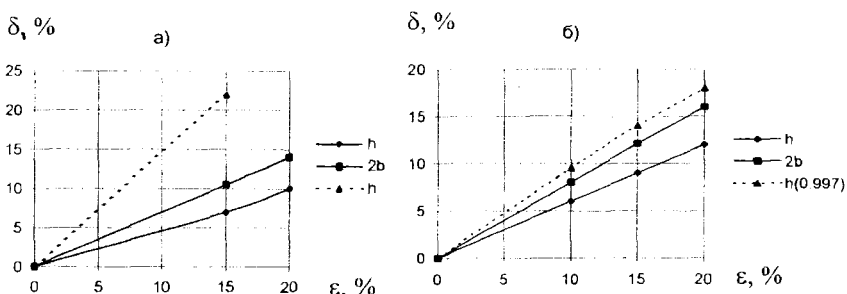


Рис.24 Зависимость погрешности оценки параметров дефекта от погрешности измерения поля

а) - ПД, б) - ДВП, Но = 100 А/см, сталь 3

Для учета произвольных форм распознаваемых дефектов в обучающую выборку следует включать модели дефектов разных форм и типоразмеров. Оценки геометрических параметров дефекта будут иметь допустимую погрешность, если обучающая выборка дефектов создается с учетом влияния формы дефекта на его признаки классификации. В качестве параметра, характеризующего влияние формы на признаки дефекта, предложена разность энтропии его состояния:

$$I = \frac{1}{2} \ln(\Delta_{N2}/\Delta_{N1}), \quad (26)$$

где  $N$  – количество признаков дефекта,  $\Delta_{Ni}$  – определитель  $N$  – мерной ковариационной матрицы признаков для  $i$ -го дефекта. При изменении глубины дефекта  $h$  на величину  $\Delta h$  при неизменности его остальных геометрических параметров

изменение                      разности                      энтропии                      равно:

$$I(h)|_{2b=\text{const}} = \frac{1}{2} \text{Ln} \left[ \Delta_N(h+\Delta h) / \Delta_N(h) \right] \Big|_{2b=\text{const}} \quad \text{Для}$$

оценки глубины дефекта с точностью не менее  $\Delta h$  при изменении его формы для разности энтропии  $I$  должно быть справедливо:  $I \leq I(h)|_{2b=\text{const}}$ . В общем случае, когда

оцениваются одновременно все параметры дефекта, должно быть справедливо:

$$I \leq \inf [I(h), I(2b)], \quad h \in R_h, \quad 2b \in R_{2b}, \quad (27)$$

где  $R_h, R_{2b}$  - множество значений геометрических параметров дефекта. Неравенство (27) является условием оценки геометрических параметров дефекта с точностью не менее  $\Delta h$  и  $\Delta(2b)$ , когда форма дефекта отличается от заданного на величину разности энтропии  $I$ . На примерах линейной токовой модели наклонного дефекта и трапецевидного дефекта на основе формулы (26) оценены допустимые интервалы изменения параметров дефекта, обеспечивающие заданную точность оценки его параметров при измерении признаков дефекта с определенной погрешностью. Методика проверена на искусственных образцах с дефектами разной формы.

**В шестой главе** решается задача определения геометрических параметров дефекта, которая в математической постановке формулируется следующим образом. Имеется функционал, который зависит от признаков измеренного магнитного поля распознаваемого дефекта и признаков теоретической модели дефекта:

$$M[\bar{p}] = \sum_{j=1}^N \left[ a_j^T(\bar{p}) - a_j^? \right]^2, \quad (28)$$

где  $\bar{p} = \{2b, h_1, h_2\}$  - вектор геометрических параметров дефекта (рис.2),  $a_j^T(\bar{p})$ ,  $a_j^?$  - признаки поля теоретической модели и измеренного магнитного поля распознаваемого дефекта. Требуется найти такой вектор  $\bar{p}^* = \{2b, h_1, h_2\}$ , при котором в точке минимума функционала (28) для малых

положительных чисел  $\varepsilon$  и  $\delta(\varepsilon)$  выполняется условие:

$$\left| \begin{matrix} -^* & -^3 \\ p & -p^3 \end{matrix} \right| \leq \delta(\varepsilon), \text{ если } \left| a_j^T - a_j^3 \right| \leq \varepsilon. \text{ Здесь } \delta, \varepsilon > 0 \text{ имеют смысл}$$

погрешности параметров,  $\begin{matrix} -^* \\ p \end{matrix}$  – вектор истинных параметров распознаваемого дефекта. При этом предполагается, что геометрические параметры модели  $\{2b, h_1, h_2\}$ , соответствующие минимуму функционала (28), будут весьма близки к истинным параметрам распознаваемого дефекта.

На основе минимизации функционала (28) определены геометрические параметры ПД в ферромагнитной пластине, при этом в качестве признаков магнитного поля дефекта взяты значения максимума  $x$  - составляющей поля, измеренные на разных высотах, для которых характерно высокое соотношение сигнал/шум. Установлено, что оптимальное количество измеренных значений магнитного поля дефекта, обеспечивающие существенное уточнение оцениваемых параметров дефекта, составляет не более 10 - 15. Описана методика поэтапной минимизации функционала (26), которая обеспечивает хорошую точность оценки глубины и ширины ПД.

Параметры наклонного ПД (длина грани, ширина и угол наклона дефекта) в пластине оцениваются на основе сравнения в функционале (26) распределение  $x$  - составляющей поля дефекта в воздухе (рис.14) с полем токовой модели наклонного дефекта (рис.25). Точнее определяется угол наклона дефекта. Точность оценки выше для больших углов наклона дефекта, так как для них происходит существенное изменение топографии магнитного поля дефекта. Исследованы условия, влияющие на точность оценки параметров наклонного дефекта. Для увеличения точности оценки глубины дефекта предлагается использовать тот факт, что минимум в распределении поля дефекта находится над отрицательным током  $-J$  (рис.25). На основе связи координаты минимума  $x$  - составляющей магнитного поля наклонного дефекта  $x_m$  с  $x$  - координатой отрицательного тока в теоретической модели, для оценки глубины дефекта имеем формулу:

$$h \approx x_m / (K \sin \alpha), \quad (29)$$

где  $K$  – поправочный коэффициент, являющейся функцией от параметров дефекта и высоты измерения поля (рис.26). В

формуле (29) координата  $x_m$  определяется из измеренного распределения магнитного поля дефекта в воздухе, угол  $\alpha$  - на основе минимизации функционала (28).

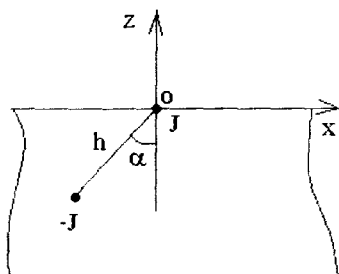


Рис.25 Токвая модель наклонного ПД

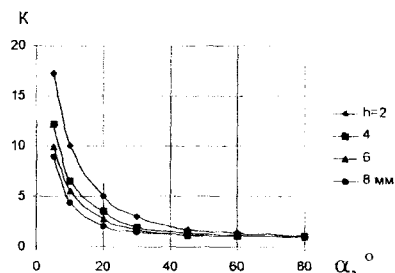


Рис.26 Зависимость поправочного коэффициента от параметров дефекта  $z = 1 \text{ мм}$ ,  $2b = 0.1 \text{ мм}$

Для увеличения точности оценки геометрических параметров дефекта используется сглаживающий функционал, который зависит от признаков измеренного поля и теоретической модели дефекта:

$$M^{\gamma}[\bar{p}, \gamma] = \sum_{j=1}^N \left[ a_j^T(2b, h_1, h_2) - a_j^{\gamma} \right]^2 + \gamma \Omega \left[ a_j^T(2b, h_1, h_2), a_j^0 \right] \quad (30)$$

где  $a_j^T(2b, h_1, h_2)$ ,  $a_j^{\gamma}$  - признаки классификации - коэффициенты Фурье для модели и измеренного магнитного поля дефекта,  $\gamma$  - параметр регуляризации ( $\gamma < 1$ ),  $a_j^0$  - параметр, принадлежащий множеству значений коэффициентов Фурье,  $\bar{p} = \{2b, h_1, h_2\}$  - вектор решения, соответствующий минимуму сглаживающего функционала (30),  $\Omega$  - стабилизирующий функционал. Исследованы вопросы поиска оптимальных значений параметров  $\gamma$ ,  $\Omega$ ,  $a^0$  функционала. Установлено, что использование метода регуляризации в несколько раз уменьшает погрешность

оценки параметров дефекта по сравнению с нерегуляризованным решением задачи. Из функционала (30), при использовании в нем коэффициентов Фурье (13) получены аналитические выражения оптимальных значений геометрических параметров ПД:

$$2b^* = \frac{1}{\gamma+1} \sum_{j=1}^N (a_j^3 + \gamma a_j^0) F_{1j} / \sum_{j=1}^N F_{1j}^2,$$

$$\text{где } F_{1j} = \frac{\sigma}{\pi} \exp(-jz) [1 - \exp(-jh)], \quad (31)$$

$$h^* = \frac{1}{\gamma+1} \sum_{j=1}^N (a_j^3 + \gamma a_j^0) F_{2j} / \sum_{j=1}^N F_{2j}^2,$$

$$\text{где } F_{2j} = \frac{\sigma b}{\pi} \exp(-jz), \text{ при } jh \gg 1, \quad (32)$$

которые показывают механизм влияния параметра регуляризации на параметры дефекта (рис.27). Коэффициент  $1/(1+\gamma)$  в формулах (31) - (32) является поправочным множителем. Параметр регуляризации меняется согласованно с погрешностью измерения, для него получена формула зависимости от погрешности измерения:

$$\gamma \approx \varepsilon / (1 + \varepsilon) \approx \varepsilon - \varepsilon^2 + \varepsilon^3 - \varepsilon^4 + \dots, \quad (33)$$

которая хорошо согласуется с экспериментально полученными данными (рис.28). Исследованы разные виды стабилизирующих функционалов  $\Omega$ . Из формул для коэффициенты Фурье (13) следует, что при умножении их на весовую функцию типа  $w_j = \exp(jz)$  ( $j = 1, 2, \dots, N$ ) они

зависят лишь от параметров дефекта, при этом увеличивается вклад коэффициентов со старшими индексами  $j$ . Увеличение вклада признаков с малыми значениями происходит также при сравнении признаков в метрике Камберра, в котором сглаживающий функционал имеет вид:

$$M^\gamma[p, \gamma] = \sum_{j=1}^N \left| \frac{a_j^T - a_j^3}{a_j^T + a_j^3} \right| + \gamma \sum_{j=1}^N \left| \frac{a_j^T - a_j^0}{a_j^T + a_j^0} \right| \quad (34)$$

На основе численных экспериментов для модели дефекта в пластине получены значения точности оценок геометрических параметров дефекта, получаемых путем минимизации сглаживающих функционалов (30), (34). Установлено, что для широкой области изменения геометрических параметров дефекта можно выбрать универсальное значение параметра регуляризации, которое обеспечивает оценку геометрических параметров с погрешностью, не превышающей заданного уровня.

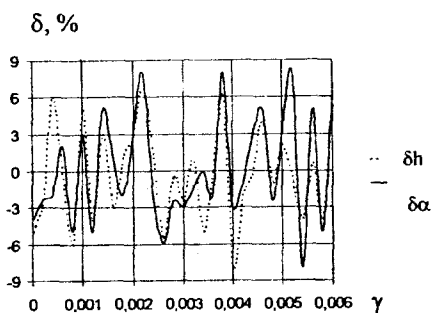


Рис.27 Зависимость погрешности параметров наклонного ПД от параметра регуляризации  
 $h = 6 \text{ мм}$ ,  $2b = 0.2 \text{ мм}$ ,  $z = 1 \text{ мм}$ ,  
 $\alpha = 45^\circ$ ,  $\varepsilon = 5\%$

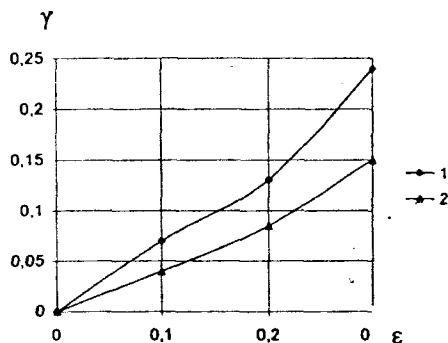


Рис.28 Зависимость параметра регуляризации от погрешности поля  
 1-функционал (30), 2-(34)

На основе анализа зависимости коэффициентов Фурье от геометрических параметров дефекта установлено, что в первом приближении явная зависимость существует лишь для параметров  $h$  и  $2b$  дефекта, исходя из которого предположено, что именно эти параметры дефекта будут оцениваться наиболее точно при решении обратной задачи. Исследования показали неэффективность применения в сглаживающих функционалах (30), (34) относительных коэффициентов Фурье.

В работе приведены результаты оценки параметров дефекта в искусственных образцах на основе минимизации оптимизированного сглаживающего функционала (30), (34) в которых используется нелинейная теоретическая модель



дефекта, ранее полученная в главе 2. Из них следует, что погрешность оценки параметров дефекта не превышает 10 – 15%, при погрешности измерения поля не более 30%, при этом наиболее точно оценивается параметр  $h$  дефекта. Параметр  $h_1$  (глубина залегания) дефекта определяется с большой погрешностью, но для него существует «пороговый уровень», относительно которого можно оценивать тип дефекта. Для ПД полученные значения параметра  $h_1 \leq 0.3$  мм, для ВД и ДВП  $1.2 \leq h_1 \leq 4$  мм. На основе анализа величины параметра  $h_1$  предлагается классифицировать дефект как ПД или ВД. Метод оценки был апробирован на образцах с искусственными и естественными дефектами сплошности.

**В седьмой главе** рассмотрены методы предварительной математической обработки измеренной информации, с целью устранения случайных помех, постоянной составляющей в сигнале и восстановления истинных значений измеренного поля дефекта, без применения которых эффективность разработанных методов оценки типа и параметров дефекта существенно снижается.

Измеренный сигнал с выхода преобразователя поля обычно содержит линейную или нелинейную низкочастотную составляющую (тренд), который интерполируется полиномом степени  $K \leq 3$  (рис.29):

$$u_0^T(x) = \sum_{j=1}^K b_j x^j, \quad (35)$$

где  $b_j$  - постоянные коэффициенты, которые определяются

методом наименьших квадратов. В работе приведены аналитические выражения для вычисления коэффициентов в формуле (35). Установлено, что качество восстановления участка сигнала без тренда, указывающего на наличие дефекта, зависит от отношения общей длительности измеренного сигнала к ширине топографии поля дефекта. Значения  $x$  – составляющей магнитного поля дефекта восстанавливаются с погрешностью не более 7 - 10%, если ширина топографии поля  $x_m$  и общая длина измеренного сигнала  $x_1$  относятся как  $x_1/x_m \geq 9 - 10$ , при этом для

соотношений  $x_1/x_m \geq 1$  амплитуда магнитного поля дефекта имеет погрешность не более 8 - 9%. Для  $z$  - составляющей магнитного поля дефекта интервал удовлетворительного восстановления невелик:  $|x| \leq 3 - 5$  мм.

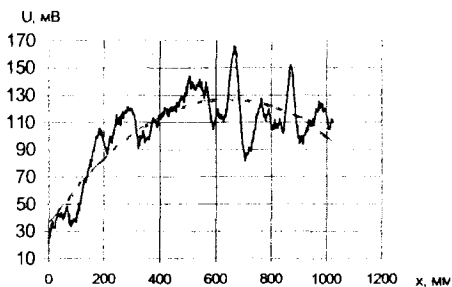


Рис.29 Сигнал с нелинейным трендом  
 $H_0 = 50$  А/см,  $z = 3$  мм, сталь 10

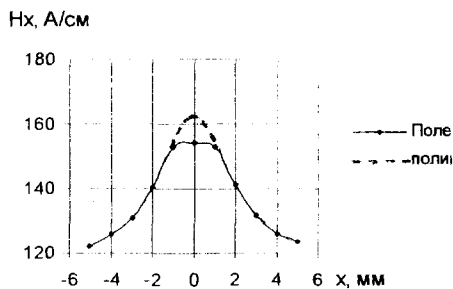


Рис.30 Усеченное и восстановленное поле дефекта

Удаление из измеренного сигнала нелинейного тренда позволяет взять в качестве признака наличия дефекта наибольшее значение сигнала, выделяемое на фоне помех. Рассмотрены способы выявления наличия дефекта и его магнитного поля в общем измеренном сигнале. Сумма

коэффициентов Фурье для измеренного сигнала  $S = \sum_{j=0}^N a_j$

позволяет ввести пороговый уровень, ниже которого поле дефекта не отличается от помех. Надежность выделения магнитного поля дефекта на фоне случайных помех увеличивается при использовании корреляционной функции:

$$K = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} (H'_x(x_i) - \overline{H'_x(x)}) (H'_x(x_{i+1}) - \overline{H'_x(x)}), \quad (36)$$

где  $H'(x) = H(x)/H_m(x)$ ,  $\overline{H'(x)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H'_i(x)$ ,  $H_m(x)$  - наибольшее

значение измеренного сигнала. Показано, что для магнитного поля дефекта корреляционная функция (36) является положительной, для случайных помех - отрицательной. Предлагается совместное использование параметров  $S$  и  $K$ .

Для обеспечения высокой точности вычисления спектральных и иных характеристик магнитного поля дефекта требуется интерполяция измеренного сигнала. Установлено, что наиболее оптимальным является интерполяция измеренного магнитного поля дефекта полиномами степени  $M$ :

$$H_x(x) = \sum_{j=1}^M b_j x^j, \quad (37)$$

где  $b_j$  - постоянные коэффициенты,  $M$  - наибольшая степень полинома, при этом наиболее оптимальной является значение  $M=6$ , при которой одинаково хорошо интерполируются магнитные поля как поверхностных, так и внутренних дефектов.

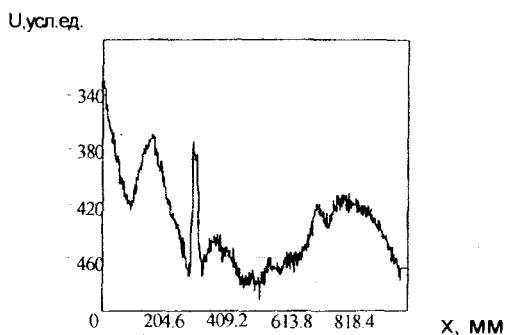
Показано, что при интерполяции магнитного поля дефекта полиномом (37) возможно удовлетворительное восстановление его полной формы, если при отсечении сигнала теряется не более 30% измеренных значений (рис.30).

При контроле изделий разные внешние факторы приводят к флуктуации поля рассеяния в области измерения магнитного поля, что отражается в сигнале как случайное изменения фонового уровня. На основе различия пространственного распределения магнитного поля рассеяния и поля дефекта, предложена методика удаления из сигнала его низкочастотной составляющей. Установлено, что спектры тренда (35) сигналов, измеренные на разных высотах от поверхности изделия и характеризующие низкочастотную составляющую, отличаются на постоянную величину  $K_1$ . Скорректированные спектры сигналов вычитаются и осуществляя обратное преобразование Фурье полученной разности спектров, восстанавливается исходный сигнал без низкочастотного шума:

$$u_j = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} \left( c_j^1 - K_1 c_j^2 \right) \left( 1 - \sigma_j^2 / \bar{c}_j^2 \right) \exp(-i 2 \pi (j/N) k) \quad (38)$$

где  $c_j^1$  - спектр сигнала на высоте  $z_1$ ,  $c_j^2$  - спектр сигнала на высоте  $z_2$ ,  $\sigma_j^2$  - дисперсия,  $\bar{c}_j$  - средние значения гармоник в спектре сигнала,  $i^2 = -1$ .

а)



б)

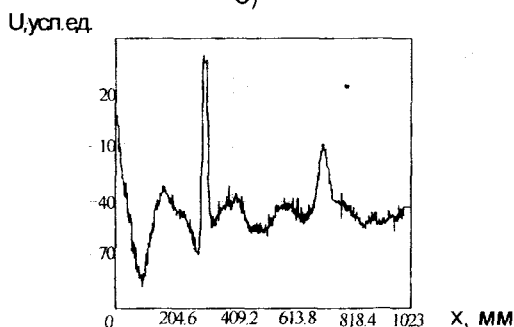


Рис.31 Сигнал поля дефектов до (а) и после (б) обратного преобразования Фурье разности спектров

Применение данной методики показало эффективное удаление низкочастотного фоновый уровня из измеренного сигнала и увеличение амплитуды магнитного поля мелких дефектов (рис.31).

**В восьмой главе** показана реализация описанных в данной работе методов математической обработки и интерпретации измеренных магнитных полей дефектов в ферромагнитном изделии в программном обеспечении ряда электромагнитных дефектоскопов, производимых в МНПО «Спектр»: МИТ-1, ВД -12НФМ, ВД - 89НМ.

**В заключении** приведены основные выводы и результаты диссертационной работы.

**В приложениях** приведены математические расчеты, касающиеся дифференциального анализа распределения магнитного поля группы дефектов, использования его для разрешения и восстановления магнитного поля отдельного дефекта, получения уравнения эллипсов равной плотности вероятности и исследования параметров сглаживающего функционала.

**Основные выводы и результаты диссертационной работы.**

В результате проведенных исследований и теоретического обобщения задач магнитной дефектоскопии и дефектометрии, развиты основы магнитной дефектоскопии, разработаны теория и принципы создания физических и математических методов оценки геометрических параметров дефектов в ферромагнитном изделии, созданы алгоритмы для соответствующего программного обеспечения электромагнитных дефектоскопов.

1. Получена универсальная модель дефекта в ферромагнитной пластине, описывающая магнитные поля как поверхностных, так и внутренних дефектов, учитывающая нелинейность магнитных свойств материала во всей области определения кривой намагничивания материала, влияние граничных поверхностей пластины на поле дефекта. Предложена общая токовая модель дефекта с учетом неоднородного намагничивания граней дефекта, что позволило оценить влияние неоднородности распределения поверхностных зарядов на гранях на величину магнитного поля. Получены аналитические выражения для плотности поверхностных зарядов на гранях дефекта в трубе и

распределения магнитного поля дефекта над поверхностями трубы, позволившие исследовать влияние кривизны поверхности на магнитное поле поверхностного и внутреннего дефектов.

2. Предложена феноменологическая модель формирования остаточного магнитного поля дефекта в ферромагнитном изделии, которая позволила учесть нелинейность магнитных свойств материала и магнитный гистерезис. Установлено, что остаточная намагниченность ферромагнетика влияет на величину магнитного поля дефекта при повторном приложении намагничивающего поля, которая может как уменьшаться, так и увеличиваться.

Разработана модель формирования магнитного поля группы дефектов в ферромагнитном изделии. Введение понятия минимального расстояния разрешения группы дефектов по топографии магнитного поля позволило исследовать его зависимость от условий измерения и параметров дефекта. Показано, что по высоте измерения поля можно заранее предсказать величину минимального расстояния разрешения дефектов. Установлено, что количество экстремумов в топографии магнитного поля и в распределении его второй производной соответствуют количеству дефектов в группе, на основе чего предложен метод разрешения и восстановления магнитного поля группы дефектов.

3. Установлено, что для распределения поля дефекта существуют условия, при которых значение магнитного поля пропорционально глубине дефекта и слабо зависит от остальных параметров, предложен соответствующий алгоритм оценки глубины дефекта. На основе вычисления дисперсии топографии магнитного поля дефекта разработан алгоритм оценки типа дефекта. Показано, что по знаку абсциссы координаты центра тяжести топографии магнитного поля определяется сторона наклона дефекта или сторона вытянутости дефекта неправильной формы.

4. Доказано, что использование в качестве признаков классификации дефектов сплошности коэффициентов в разложении магнитного поля в ряд Фурье и Чебышева – Эрмита позволяет существенно уменьшить объем данных при минимальной потере полезной информации о дефекте. Получены аналитические выражения коэффициентов Фурье для основных теоретических моделей дефектов, что

позволило уточнить количественные оценки параметров дефекта на их основе. Предложены аналитические выражения коэффициентов в разложении магнитного поля дефекта конечной протяженности в двукратный ряд Фурье, на основе чего установлено, что при определенном соотношении индексов в коэффициентах возможна избирательная оценка отдельных геометрических параметров дефекта.

Показано, что ферромагнитная пластина для магнитного поля дефекта играет роль низкочастотного фильтра, функция преобразования которой зависит от толщины пластины и глубины дефекта, и не зависит от остальных параметров.

5. Предложены аналитические выражения, на основе которых по величине количества информации в признаках классификации можно предсказать ожидаемую точность оценки геометрических параметров дефекта, что позволило установить, что в признаках классификации дефектов содержится наибольшая информация о глубине дефекта, наименьшая – об угле наклона дефекта относительно поверхности изделия.

6. Предложен способ оптимизации методов оценки параметров дефекта на основе детерминированных и вероятностных признаков классификации, что позволило увеличить точность оценки параметров дефекта и установить, что точность слабо зависит от вида используемого признака классификации и высоты измерения поля, установлено также, что увеличение высоты измерения магнитного поля дефекта приводит к увеличению погрешности оценки типа дефекта.

Определено, что наибольшая вероятность ошибочного решения существует при оценке типа поверхностного дефекта и дефекта внутренней поверхности. Предложено использовать разность энтропии признаков классификации в качестве параметра, характеризующего форму дефекта. На ее основе для ряда теоретических моделей дефектов установлены допустимые интервалы изменения геометрических параметров, при которых обеспечивается оптимальная точность их оценки.

7. Разработана методика оценки геометрических параметров дефекта на основе минимизации функционала, состоящего из экспериментально измеренного магнитного поля и теоретической модели дефекта. Установлено, что

использование сглаживающего функционала для оценки параметров дефектов разных типов приводит к увеличению точности оценки в несколько раз, при этом для широкой области изменения параметров дефекта показана возможность выбора некоторого универсального значения параметра регуляризации, которое обеспечивает оценку параметров дефекта с оптимальной погрешностью.

8. Доказано, что при удалении из измеренного сигнала полиномиального тренда второго порядка, для удовлетворительного восстановления истинных значений сигнала требуется определенное соотношение между шириной топографии поля дефекта и общей длиной измеренного сигнала. Установлено, что экстремальные значения составляющих магнитного поля дефекта восстанавливаются с высокой точностью при любом соотношении ширины магнитного поля дефекта и общей длительности измеренного сигнала.

Предложена методика разделения поля дефекта и помех, основанная на сравнении суммы коэффициентов Фурье с некоторым порогом дискриминации, а также по значению корреляционной функции для измеренного сигнала, основанная на том, что для магнитного поля дефекта корреляционная функция является положительной, для случайного шума - отрицательной величиной.

Установлено, что при полиномиальной интерполяции магнитного поля дефекта возможно восстановление общей формы распределения при отсечении в измеренном сигнале до 30 % значений.

9. Предложена методика удаления низкочастотного фонового уровня магнитного поля рассеяния из измеренного сигнала путем вычитания спектров сигналов, измеренных датчиком магнитного поля на разных высотах с последующим обратным преобразованием Фурье, что позволило существенно увеличить выявляемость мелких дефектов.

Разработанные методы предварительной обработки измеренной информации, оценки типа и геометрических параметров дефекта реализованы в программном обеспечении электромагнитных дефектоскопов МИТ – 1, ВД – 12НФМ, ВД – 89НМ.



**Основные результаты опубликованы в  
следующих работах.**

1. Загидулин Р.В., Мужичкий В.Ф., Курозаев В.П. Расчет магнитостатического поля внутреннего дефекта и дефекта внутренней поверхности в ферромагнитной пластине. 1. Магнитное поле внутри ферромагнетика. – Дефектоскопия, 1997, №1, с. 46 – 54.
2. Загидулин Р.В., Мужичкий В.Ф., Курозаев В.П. Расчет магнитостатического поля внутреннего дефекта и дефекта внутренней поверхности в ферромагнитной пластине. 2. Магнитное поле дефекта в воздухе. Нелинейная среда. – Дефектоскопия, 1997, №1, с. 55 – 62.
3. Загидулин Р.В., Щербинин В.Е. Магнитное поле дефекта в ферромагнитной пластине. – Дефектоскопия, 1991, №8, с.33 – 39.
4. Загидулин Р.В., Шур М.Л., Щербинин В.Е. К определению геометрических параметров поверхностных дефектов. В кн.: 10 Уральская научно – техническая конференция, Ижевск, 1989.
5. Загидулин Р.В., Шур М.Л., Щербинин В.Е. О полях поверхностных дефектов. В кн.: 7 Уральская научно – техн. конференция, Ижевск, 1986.
6. Загидулин Р.В., Шур М.Л., Щербинин В.Е. К количественному расчету поля поверхностных дефектов. В кн.: 8 Уральская научно – техн. конференция, Челябинск, 1987.
7. Загидулин Р.В., Дударев М.С., Щербинин В.Е., Ваулин С.Л. Определение параметров поверхностного дефекта, расположенного под углом к поверхности ферромагнитного изделия. – Дефектоскопия, 1994, №3, с.42 – 49.
8. Загидулин Р.В. Токовая модель поверхностного дефекта при неоднородном распределении магнитных зарядов на его гранях. – Дефектоскопия, 1995, №11, с. 38 – 42.
9. Загидулин Р.В., Дударев М.С., Щербинин В.Е. Определение параметров искусственных и естественных поверхностных дефектов в ферромагнитных изделиях. – Дефектоскопия, 1994, №2, с. 38 – 46.
10. Загидулин Р.В., Игумнова Н.Б., Щербинин В.Е. Распознавание дефектов сплошности в магнитной дефектоскопии. – Дефектоскопия, 1994, №5, с. 68 – 79.

11. Загидулин Р.В., Ничипурук А.П., Игумнова Н.Б., Сомова В.М. Определение качества термической обработки конструкционных сталей методами теории распознавания. – Дефектоскопия, 1993, №2, с.73 – 78.
12. Загидулин Р.В., Щербинин В.Е. . Определение геометрических параметров дефектов сплошности в ферромагнитном изделии. Детерминированные признаки классификации. – Дефектоскопия, 1994, №12, с. 70 – 81.
13. Загидулин Р.В., Дякин В.В., Дударев М.С. и др. Способ определения параметров поверхностных дефектов типа трещины на ферромагнитном объекте. – Авт. свид. №1777067, Бюл. изобр., 1992, № 43.
14. Загидулин Р.В., Щербинин В.Е. Способ определения параметров дефекта в ферромагнитном изделии. – Авт. свид. №1820310, Бюл. изобр., 1993, № 21.
15. Загидулин Р.В., Щербинин В.Е. Качество и информативность признаков классификации дефектов сплошности. Количество информации о параметрах дефекта. – Дефектоскопия, 1994, №12, с.56 – 69.
16. Загидулин Р.В. О влиянии условий контроля на распознаваемость дефектов сплошности в изделиях при их контроле магнитными методами. В кн.: 1 научная конференция молодых ученых – физиков РБ, Уфа, 1994.
17. Загидулин Р.В. Об оценке формы при распознавании дефектов сплошности. – Дефектоскопия, 1995, № 12, с.10 – 16.
18. Загидулин Р.В. О системах распознавания дефектов сплошности при внутритрубной дефектоскопии. В кн.: 5 Международная деловая встреча «Диагностика - 95», Ялта, 1995.
19. Загидулин Р.В. Использование вероятностных признаков классификации для оценки типа и параметров дефектов сплошности в ферромагнитных изделиях. – Дефектоскопия, 1995, №11, с. 43 – 52.
20. Загидулин Р.В. Некоторые особенности топографии магнитных полей дефектов сплошности. – Дефектоскопия, 1995, №9, с.55 – 62.
21. Загидулин Р.В. К расчету признаков классификации дефектов сплошности конечной протяженности в ферромагнитных изделиях. – Дефектоскопия, 1995, №10, с. 50 – 58.

22. Загидулин Р.В., Мужичкий В.Ф., Курозаев В.П. Магнитоэлектростатическое поле внутреннего дефекта (ВД) и дефекта внутренней поверхности (ДВП) в ферромагнитной пластине. В кн.: 14 Российская научн. - техн. конференция «Неразрушающий контроль и диагностика», Москва, 1996.
23. Загидулин Р.В. Выбор сглаживающего функционала для оценки геометрических параметров дефектов сплошности в ферромагнитных изделиях. – Дефектоскопия, 1997, №3, с.14 – 25.
24. Загидулин Р.В., Мужичкий В.Ф., Курозаев В.П. Магнитное поле дефекта типа трещины в ферромагнитной трубе. – Дефектоскопия, 1999, №5, с. 18 – 30.
25. Загидулин Р.В., Мужичкий В.Ф. К вопросу предварительной обработки измеренного сигнала магнитного поля дефекта сплошности. – Дефектоскопия, 1998, №5, с. 32 – 40.
26. Загидулин Р.В. Расчет остаточного магнитного поля дефекта сплошности в ферромагнитном изделии. 1. Магнитное поле внутри ферромагнетика. – Дефектоскопия, 1998, №10, с. 21 – 32.
27. Загидулин Р.В. Расчет остаточного магнитного поля дефекта сплошности в ферромагнитном изделии. 2. Остаточное магнитное поле дефекта в воздухе. – Дефектоскопия, 1998, №10, с. 33 – 39.
28. Загидулин Р.В., Мужичкий В.Ф., Савенков Д.В. Влияние толщины ферромагнитной пластины на магнитное поле дефекта сплошности. – Дефектоскопия, 1999, №7, с. 50 – 57.
29. Загидулин Р.В. Некоторые методы математической обработки магнитоэлектростатического поля дефекта сплошности в ферромагнитном изделии. В кн.: 2 Международная конференция «Компьютерные методы и обратные задачи в неразрушающем контроле и диагностике», Минск, 1998.
30. Загидулин Р.В., Мужичкий В.Ф., Савенков Д.В. К вопросу о выявлении дефектов сплошности на фоне случайных помех и их классификации. В кн.: 15 Российская научн. – техн. конф. «Неразрушающий контроль и диагностика», Москва, 1999.
31. Загидулин Р.В., Мужичкий В.Ф. К вопросу о предварительной математической обработке сигнала от магнитных полей дефектов сплошности естественного происхождения и их классификации. – Дефектоскопия, 1999, №11, с. 27 – 37.

32. Загидулин Р.В. К расчету магнитного поля дефекта сплошности с учетом нелинейности магнитных свойств ферромагнетика. – Дефектоскопия, 2000, №5, с.43 – 54.
33. Загидулин Р.В., Мужичкий В.Ф. Некоторые дополнения к линейной токовой модели дефекта сплошности в ферромагнитном изделии. – Дефектоскопия, 2000, №4, с. 37 – 46.
34. Загидулин Р.В., Мужичкий В.Ф., Курозаев В.П. О разрешении дефектов сплошности по топографии магнитного поля. – Дефектоскопия, 2000, № 5, с. 46 – 56.
35. Загидулин Р.В., Мужичкий В.Ф., Курозаев В.П. Вычисление функции преобразования спектра магнитного поля поверхностного дефекта и восстановление магнитного поля внутреннего дефекта соответствующих размеров в ферромагнитной пластине. – Дефектоскопия, 2000, №12, с. 20 – 27.
36. Загидулин Р.В., Мужичкий В.Ф., Бизюлев А.Н. О влиянии конечных размеров преобразователя на измерение магнитного поля поверхностного дефекта. – Контроль. Диагностика, 2001, №10.
37. Загидулин Р.В. Об одной обратной задаче магнитной дефектоскопии – восстановлении магнитного поля группы дефектов сплошности в ферромагнитном изделии. – Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2002, № 2, с.25 – 34.
38. Загидулин Р.В., Мужичкий В.Ф. Определение геометрических параметров дефекта сплошности в ферромагнитной пластине путем минимизации сглаживающего функционала.1. Исследование параметров сглаживающего функционала и признаков классификации дефекта сплошности. – Дефектоскопия, 2001, №10, с. 3 - 12.
39. Загидулин Р.В., Мужичкий В.Ф. Определение геометрических параметров дефекта сплошности в ферромагнитной пластине путем минимизации сглаживающего функционала.2. Результаты оценки параметров дефекта сплошности. - Дефектоскопия, 2001, №10, с. 13 – 19.
40. Загидулин Р.В., Мужичкий В.Ф., Бизюлев А.Н. Восстановление магнитного поля группы дефектов сплошности в ферромагнитном изделии. – Дефектоскопия, 2001, №11, с.85 - 90.
41. Загидулин Р.В., Курозаев В.П. Способ устранения

мешающего влияния магнитного поля рассеяния в воздухе при неразрушающем контроле ферромагнитного изделия. – Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2001, №8, с.31 – 34.

42. Загидулин Р.В., Мужичкий В.Ф., Карабчевский В.А., Бизюлев А.Н. Оценка типа и геометрических параметров дефектов сплошности в ферромагнитной пластине. В кн.: 3 Международная научн. конф. «Компьютерные методы и обратные задачи в неразрушающем контроле и диагностике», Москва, 2002.

43. Золотовицкий А.Б., Шур М.Л., Загидулин Р.В. Влияние нелинейности ферромагнитной среды на формирование магнитостатического поля внутреннего дефекта. - Дефектоскопия, 1989, №5, с. 42 - 50.

44. Мужичкий В.Ф., Курозаев В.П., Загидулин Р.В., Савенков Д.В. К вопросу классификации дефектов сплошности в ферромагнитной трубе. – Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 1998, №10, с. 18 – 25.

45. Мужичкий В.Ф., Загидулин Р.В., Бизюлев А.Н. Восстановление магнитного поля группы дефектов сплошности в ферромагнитном изделии. В кн.: 3 Международная научн. конф. «Компьютерные методы и обратные задачи в неразрушающем контроле и диагностике», Москва, 2002.

46. Сандовский В.А., Куковенко А.В., Загидулин Р.В. Способ измерения глубины дефекта в ферромагнитном изделии и устройство для его осуществления. - Патент РФ № 2034235, Бюл. изобр., 1995, № 12.

47. Шур М.Л., Загидулин Р.В., Щербинин В.Е. Теоретические вопросы формирования поля поверхностного дефекта. – Дефектоскопия, 1988, №3, с. 14 – 25.

48. Шур М.Л., Загидулин Р.В., Щербинин В.Е. Расчет поля поверхностного дефекта в нелинейной ферромагнитной среде. – Дефектоскопия, 1987, №2, с. 3 – 9.

49. Шур М.Л., Загидулин Р.В., Щербинин В.Е. Самосогласованный расчет магнитостатического поля поверхностного дефекта. – Дефектоскопия, 1988, №10, с. 3 – 13.

50. Шур М.Л., Загидулин Р.В., Щербинин В.Е. Теоретические вопросы расчета магнитных полей дефектов в ферромагнитных изделиях. В кн.: 11 Всесоюзная научн. – техн. конференция, Москва, 1987.

51. Щербинин В.Е., Шур М.Л., Загидулин Р.В. Топография магнитного поля узкого поверхностного дефекта. – Дефектоскопия, 1986, №7, с.86 – 88.

Загидулин Ринат Васикович

РАСПОЗНАВАНИЕ ДЕФЕКТОВ СПЛОШНОСТИ  
В ФЕРРОМАГНИТНЫХ ИЗДЕЛИЯХ

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

*Лицензия на издательскую деятельность  
ЛР № 021319 от 05.01.99 г.*

Подписано в печать 31.01.02 г. Формат 60х84/16.  
Бумага офсетная. Компьютерный набор.  
Отпечатано на ризографе. Гарнитура Times.  
Усл. Печ.л. 2,76. Уч.-изд.л. 2,96. Тираж 100 экз. Заказ 55.

*Редакционно-издательский центр Башкирского университета.  
Отпечатано на множительном участке Башкирского университета  
450074, Уфа, ул. Фрунзе, 32. Тел.: (3472) 236-710*